

R32を冷媒とする大容量ロータリーコンプレッサー搭載のユニバーサルスマートX EDGEシリーズ

Universal Smart X EDGE Series Air-Cooled Heat Pump Chilling Units Equipped with Large-Capacity Rotary Compressor Adopting R32 Refrigerant

遠山 新悟 TOYAMA Shingo 松本 雄紀 MATSUMOTO Yuki

空調機などの冷媒としてオゾン層破壊を引き起こさない代替フロン(HFC (ハイドロフルオロカーボン) など)への転換が図られてきたが、HFCは地球温暖化係数(GWP)が二酸化炭素(CO₂)に比べて高いことから新たな規制対象となり、生産量及び消費量のCO₂換算での段階的な削減が求められている。

東芝キャリア(株)は、空冷モジュールチラー市場で40%以上のシェアを持つユニバーサルスマートX(以下、USXと呼ぶ)シリーズにおいて、低GWP冷媒のR32を採用したUSX EDGEシリーズの開発を推進している。今回新たに、R32特有の吐出ガスの温度上昇を抑制するための液インジェクション技術を含む要素技術の改良を行い、世界最大級^(注1)の大容量化を実現したロータリーコンプレッサーを開発した。このロータリーコンプレッサーの搭載で、環境負荷を低減するとともに、業界トップクラス^(注1)の高効率運転を実現し、猛暑対策として冷房運転時の許容吸い込み外気温度の上限を現行機種種の43℃から52℃へと高め、運転範囲を拡大できた。

As a measure toward solving global environmental issues related to refrigerants for air-conditioning products, hydrofluorocarbons (HFCs) have been widely used as a replacement for chlorofluorocarbons (CFCs), which cause destruction of the ozone layer in the stratosphere. From the standpoint of global warming, however, there is a need to reduce the production and consumption of HFCs in stages through regulation due to their higher global warming potential (GWP) compared with carbon dioxide.

Toshiba Carrier Corporation is the leader in the air-cooled modular chiller market, with a share of more than 40%. We are now promoting the development of the Universal Smart X (USX) EDGE Series air-cooled heat pump chilling units equipped with a newly developed rotary compressor that realizes the world's largest class of capacity employing R32, a low-GWP refrigerant, through the improvement of elemental technologies including a liquid injection function to suppress increases in the temperature of the discharge gas peculiar to R32. As a result of these technologies, the USX EDGE Series achieves the industry's highest class of operating efficiency and expansion of the allowable temperature of the outside air taken in by the system from 43°C to 52°C, allowing it to handle extremely hot summer conditions while reducing the burden on the environment.

1. まえがき

空調機などの冷媒は、オゾン層破壊を引き起こさないHFCなどへの転換が図られてきたが、更に地球温暖化抑制の観点から、HFCを新たに規制対象とするモントリオール議定書キガリ改正が2019年1月に発効され、HFCのCO₂換算での生産量及び消費量を段階的に削減することが求められている。東芝キャリア(株)は、高効率な空冷ヒートポンプチラーの開発とその普及拡大を目指し、モジュール型空冷ヒートポンプ式熱源機でHFCのR410A冷媒を採用したUSXシリーズを2010年に商品化し、2017年には大能力機種で高効率化を図り、省スペース、加熱性能強化といった特長を持つUSX EDGEシリーズを開発してきた。しかし、R410AはGWPが比較的高く、よりGWPの低い冷媒への代替が望ましい。

(注1) 2020年3月現在、ロータリーコンプレッサーとして、当社調べ。

そこで当社は、空冷モジュールチラー市場において40%以上の市場シェアを持つUSXシリーズにおいて、GWPの低い冷媒R32を採用して地球温暖化の影響低減を推進するとともに高性能化も同時に図った、USX EDGEシリーズを新たに開発し、市場投入する。

ここでは、今回R32冷媒を採用したUSX EDGEシリーズの主な特長である世界最大級容量のロータリーコンプレッサーや、コンプレッサーに追加された液インジェクション機構などについて述べるとともに、冷房運転時の許容吸い込み外気温度範囲の拡大など、R410Aを冷媒とする現行機種と比較した性能の改善点についても述べる。

2. USX EDGEシリーズの製品概要

USX EDGEシリーズは、USX従来機の高効率・高機能という特長を更に研ぎ澄ませ、鋭さ・強み・先進性といった意味を持つedge(エッジ)をシリーズ名に加えた、大能

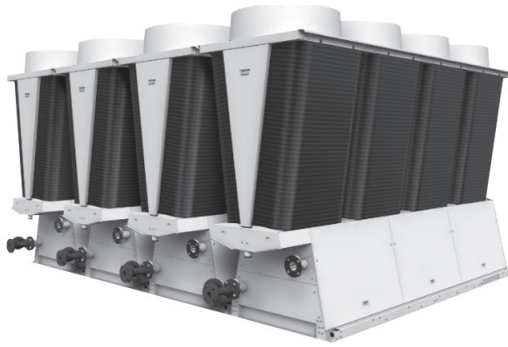


図1. USX EDGEシリーズ(4台連結時)

気流解析から生まれた、USXの独創的かつ機能性・デザイン性に優れたXフレームを継承しながら、コンパクト性、施工性、サービス性を追求した製品となっている。

USX EDGE Series (4 modules)

表1. 製品ラインアップ

Lineup of USX EDGE Series products

仕様	ポンプ	用途	タイプ	電源電圧
標準仕様	内蔵	ヒートポンプ	標準COPタイプ	200V又は 400V
			高COPタイプ	
		冷却専用	標準COPタイプ	
			高COPタイプ	
	ポンプレス	ヒートポンプ	標準COPタイプ	
			高COPタイプ	
冷却専用	標準COPタイプ			
高COPタイプ				
ブライン(不凍液)仕様	内蔵	ヒートポンプ	標準COPタイプ	200V又は 400V
			高COPタイプ	
		冷却専用	標準COPタイプ	
			高COPタイプ	
	ポンプレス	ヒートポンプ	標準COPタイプ	
			高COPタイプ	
冷却専用	標準COPタイプ			
高COPタイプ				

力モジュール型空冷ヒートポンプ熱源機である。コンパクト性を製品コンセプトにしながらも、リリースした2016年当時における世界最大級容量のコンプレッサーを搭載している。その形状は、気流解析から生まれたUSXの独創的かつ機能性・デザイン性に優れたXフレーム(X字筐体(きょうたい))を継承し、コンパクト性、施工性、サービス性を追求した製品となっている。4台を連結した製品の外観を図1に示す。ラインアップとしては60馬力(AIREDGE)、70馬力(POWEREDGE)、及び60馬力加熱性能強化(HEATEDGE)の3モデルを備え、表1のように、それぞれ標準仕様とブライン(不凍液)仕様、ヒートポンプ仕様と冷却専用仕様、標準COP(エネルギー消費効率)タイプと高

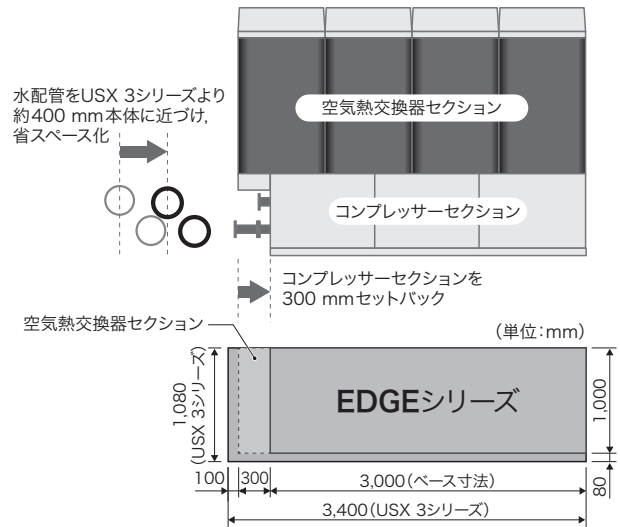


図2. エッジフォルム採用による省スペース化

エッジフォルムの採用で、コンプレッサーセクションが空気熱交換器セクションよりも300 mmコンパクトになり、従来機(USX 3シリーズ)に比べて水配管を本体に約400 mm近づけて基礎ベースサイズを1,000(幅)×3,000(奥行き)mmまで省スペース化しており、リニューアルにも柔軟に対応できる。

Compact design adopting unique shape

COPタイプ、200V仕様と400V仕様のそれぞれを選択できる。

2.1 エッジフォルムによるコンパクト設計

筐体下部にあたるコンプレッサーセクションを上部の空気熱交換器セクションよりも300 mmコンパクトにした独自の外觀形状(以下、エッジフォルムと呼ぶ)を採用している。エッジフォルムの採用により、大幅な軽量化を実現するとともに、図2に示すように、水配管と本体の間隔を従来機(USX 3シリーズ)に比べて約400 mm縮小し、リニューアルにも柔軟に対応できるように基礎ベースサイズを1,000(幅)×3,000(奥行き)mmと省スペース化している。

2.2 空調用PWMコンバーター

高調波抑制対策には、最も省エネ性が求められる低負荷領域から中負荷領域でのシステム効率を最大限に高めることに主眼を置き、空調用に最適化したPWM(パルス幅変調)コンバーターを標準搭載している。PWMコンバーターは、半導体を用いた高速スイッチングにより入力電流をほぼ正弦波にできるため、電源高調波の抑制と併せ、電源力率も向上できる。また、コンプレッサーの負荷及び回転数に応じて、インバーター回路内の直流電圧を最適制御することで、高巻き数(高誘起電圧)モーターが適用できる。その結果、高速回転時は直流電圧をモーター誘起電圧より高く昇圧し、直流電圧の昇圧が不要な低回転時には高巻き数モーターを生かしてモーター電流を低減することで、大幅に

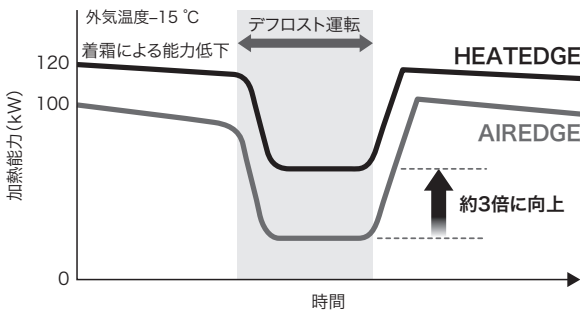


図3. デフロスト中の加熱能力の向上

外気の相対湿度を検知してデフロスト開始判断の精度を高め、適切なデフロスト運転をすることで、1台の場合、HEATEDGEはAIREEDGEに比べてデフロスト中の加熱能力が約3倍に向上する。

Improvement in heating capacity during defrosting operation

効率向上ができる。

2.3 加熱性能の強化

外気温度 -15°C での最高温水出口温度を 50°C 、更に外気温度が低い -20°C でも最高温水出口温度を 45°C として温水供給できるなど、コンプレッサーのブレード(仕切り板)2段化や軸受部の形状最適化などにより摺動(しゅうどう)部の信頼性を確保することで、最低温度 -25°C までの加熱運転外気温度範囲を実現している。また、業界初^(注2)となる外気の相対湿度検知で、デフロスト(除霜)開始判断の精度を高めることにより、適切な除霜運転を行い、運転条件などによって加熱能力が不足し温水出口温度が急速に低下する現象(コールドショック)を最小にしている。図3にデフロスト中の能力変化イメージを示す。60馬力加熱性能強化モデルのHEATEDGEは、標準の60馬力モデルであるAIREEDGEに比べ、デフロスト中の加熱能力が約3倍向上している。

2.4 熱源システム全体での最適化

負荷側機器との協調性を向上させ、熱源機本体の性能向上だけではなく、BCP(Business Continuity Plan)やデマンドレスポンスへの対応などの新たなニーズに向けた、多様なエネルギー源を使用する熱源システムの最適運用にも対応している。空調機バルブの開度情報を用いた制御により熱源システムにおける水搬送動力の削減が可能になり、また、各空調機の負荷が同じ傾向の場合は、個々の空調機バルブ制御を不要としたバルブレス制御を導入して、空調機バルブやセンサー類のないシンプルなシステムとすることで、省エネ・低コスト化を実現する。

更に、USXシリーズをはじめとした多様な熱源機器にお

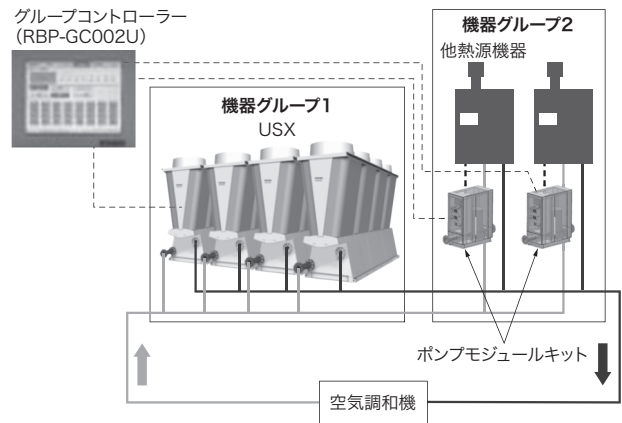


図4. USX EDGEシリーズとほかの熱源を併用した最適システムの構築例

グループコントローラーとポンプモジュールキットをオプション品としてラインアップすることで、USXシリーズやほかの熱源機器の起動・停止及び送水制御ができ、運用可能な熱源機器の選択肢が拡大してシステムの多様化が可能となっている。

Example of construction of optimal system combining USX EDGE Series with other heat source equipment

いて、柔軟な運用を可能とするグループコントローラーとポンプモジュールキットをオプション品としてラインアップすることで、USXシリーズだけではなく、ほかの熱源機器を含む最大16機器グループ、128台の熱源機器の起動・停止及び送水制御が可能となっている。これによって、図4に示すように、運用可能な熱源機器の選択肢が拡大してシステムの多様化が可能となり、エネルギーコストや季節に応じ、省エネルギーを最大化する最適なシステム構築を選択できる。

3. 開発機種の主な特長

3.1 冷媒R32の採用

地球温暖化の軽減に有効なHFC冷媒として低GWPのR32がある。図5に示すように、現行の冷媒R410AのGWPが2,090であるのに対して、冷媒R32は675であり、

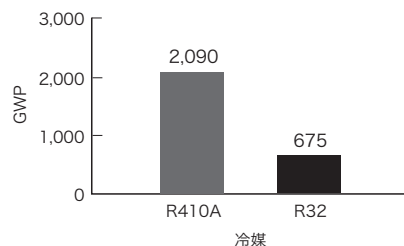


図5. R410AとR32のGWP比較

従来の冷媒R410Aに対して、冷媒R32ではGWPを約68%削減できる。

Comparison of GWP of R410A and R32 refrigerants

(注2) 2020年3月時点、ロータリーコンプレッサーとして、当社調べ。

GWPを約68%削減できる。そこで、現在家庭用エアコンや店舗用エアコンで既に採用されているR32を、チラーにも採用した。

3.2 R32を冷媒としたロータリーコンプレッサー

2017年に、R410A冷媒対応として開発した大容量DC（直流）インバーターツインロータリーコンプレッサーをR32冷媒対応として更に進化させ、信頼性向上を図り開発した。ロータリーコンプレッサーとしては、世界最大級容量である。特性の異なるR32が冷媒となることに伴うコンプレッサーへの影響としては、吐出ガス温度の上昇（圧縮室内の温度上昇）や、使用範囲圧力の上昇、冷媒の冷凍機油への相溶性変化などが挙げられる。これらはコンプレッサーの信頼性に極めて大きな影響を与える事項であり、その対策として、以下の要素技術を新たに開発している。

- (1) 液インジェクション技術 圧縮室内の温度上昇を抑制するため、冷凍サイクル内の凝縮器出口の液冷媒を絞り機構を介して減圧し、二つの圧縮室を上下に仕切る仕切り板部品を介してそれぞれの圧縮室内へと注入する。注入口は、吸い込み過程へと流入しないように冷媒圧縮途中となる位置に設け、更に公転運動しているローラー端面によって開放／封止されることで、液インジェクション量が制御される。図6に液インジェクション機構を示す。
- (2) 2段ブレードと新ローラー材料の採用 冷媒物性に伴う吐出圧力の上昇により、シリンダー室内でローラーとの接触により吸い込み側（低圧）と圧縮側（高圧）とを区切るブレードには、R410A使用時より更に大きな押し付け力が作用し、また圧縮負荷も増えるため、クランクシャフトに μm オーダーのたわみが生じ、ブレードとローラー間で局所的な接触（局圧の発生）が起こる可能性がある。そこで、耐摩耗性を向上させるため、図7

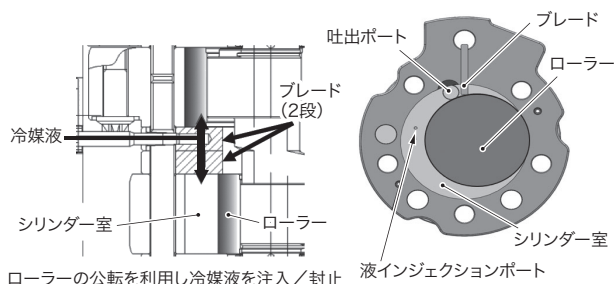


図6. 液インジェクション機構

液インジェクションの蒸発潜熱による冷却で、圧縮室内の温度上昇を抑制できる。

Liquid injection structure

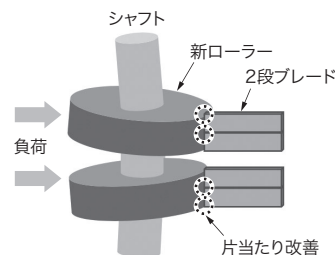


図7. 独自の2段ブレード構造

独自の2段ブレード構造によって、ブレードとローラー間の押し付け力を半減し、耐摩耗性を向上させた。

Proprietary two-stage blade structure

に示すように、当社独自のDLC（Diamond Like Carbon）コーティング処理を施したブレードを用い、更にこれを2段化することで押し付け力を半減するとともに、ローラーには摺動部となじみの良い新材料を採用した。

- (3) ダブル吐出構造と吐出ガス流路の最適化 コンプレッサーのシェルサイズを変更することなく大容量化を図る場合、循環量の増大に伴う吐出流路損失が影響度を増し、冷凍能力を頭打ちにしてしまう。その抑制策として、既存の軸受側にある吐出ポートの面積を拡大すると、デッドボリュームが増加し、効率が大幅に低下してしまうため、一つの圧縮室当たりの吐出ポート数を一つから二つに増やすことが効果的と考えられる。そこで、ブレードを軸方向に分割し、かつブレード内部で液インジェクション流路と干渉しないように吐出ポートと吐出ガス流路を設ける、ダブル吐出構造とした。この際、ブレード内のガス流路を大きく取り過ぎると、流路損失が低下する一方でブレードの変形につながり、また、圧縮室の高さ方向のクリアランスを縮小すると摺動抵抗が増大するため、信頼性と効率の両面から、吐出

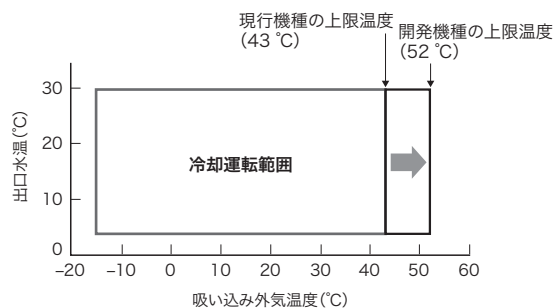


図8. 冷却運転での許容吸い込み外気温度の拡大

冷却運転の許容吸い込み外気温度範囲の上限値を、現行機種の43℃から52℃まで高め、運転範囲を拡大させた。

Expansion of allowable temperature of outside air taken in during cooling operation

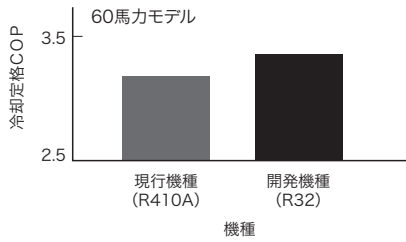


図9. 冷却定格COPの向上

現行機種より冷却定格COPを約6.0%向上させた。

Improvement in cooling coefficient of performance (COP)

ガス流路の最適化を図っている。

3.3 冷房運転時の許容吸い込み外気温度範囲の拡大

近年の異常気象や温暖化現象により猛暑日が増え、更に人工排熱の影響による都市部ではヒートアイランド現象が発生している。このような環境の中、開発機種では、図8に示すように、冷却運転の許容吸い込み外気温度範囲の上限値を、現行機種の43℃から52℃まで拡大させた。また、従来の制御器の冷却構造を見直し、制御器の部品保証範囲を確保するため、制御器冷却ファンモーターの回転数を可変として風量の最適化を行った。更に、冷凍サイクルでは、異常を発生させないように保護制御を見直した。

3.4 現行機種からの性能改善

新開発コンプレッサーの搭載、冷媒R32の採用、液インジェクション機構の追加及び最適化制御により、開発機種のため参考値ではあるが、図9に示すように、現行機種より冷却定格COPを約6.0%向上させた。

4. あとがき

USX EDGEシリーズの開発により、環境負荷低減に加え、業界トップクラスの高効率運転を達成するとともに、冷房運転時の許容吸い込み外気温度の上限値52℃を実現した。

当社は、今後も更なる環境負荷低減と高性能化を目指すヒートポンプソリューションカンパニーとして、社会及び地球環境保全に貢献していく。



遠山 新悟 TOYAMA Shingo
東芝キャリア(株)
技術統括部 熱源設計部
日本冷凍空調学会会員
Toshiba Carrier Corp.



松本 雄紀 MATSUMOTO Yuki
東芝キャリア(株)
技術統括部 熱源設計部
Toshiba Carrier Corp.